地下水モデリングのためのデータ解析手法の基礎

2. 地下水へのかん養量のモデリング

2. 1 雨水浸透・地下水かん養

平山利晶*

2. Groundwater Recharge Modeling

2. 1 Rainfall Infiltration and Groundwater Recharge

Toshiaki HIRAYAMA*

1. はじめに

帯水層や難透水層等の地下環境中での地下水、および、地下水を主な移動媒体とする物質や物理量の挙動を、模擬的に扱う方法を総称して地下水シミュレーションあるいはモデリングと言う。地下水は水文学的循環系の一要素であるが、地表水系や土壤水系を連結して取り扱うこともある。

モデリング手法を、特定のシステム(問題とする現象)に適用する際には、そのシステムを構成する要素の分解と再構築の作業が必要となる。構成要素を分解し、再構築する一連の作業をモデル化、再構築したシステムをシミュレーションモデル、地下水モデル、あるいは、単にモデルと言う。

地下水モデルは表1に示す4種類に大別される。このうち、汎用性が高く、取扱いやすい数値モデルが使用されることが多く、狭義の地下水モデルは数値モデルを指す。数値モデルには、地質、

土質、水理、その他の様々なデータが必要であるが、地下水の入り口、すなわち、かん養量は、地下水モデルの解析精度に大きく関わる要素の一つである。

かん養とは、降雨・河川水・かんがい水などの地表水が地下水系に吸収・付加される補給過程である(地学団体研究会(1996))。雨水浸透および地下水かん養はかん養現象の一部であり、前者は雨水を起源として地表から地下水に付加する浸透を、後者は雨水以外の水の浸透を意味する。

本論では、浸透過程に関わる量を浸透量、雨水浸透などが地下水体に到達した量をかん養量と呼ぶこととし、各浸透現象における水量の推計方法と、地下水モデル上での扱い方について、実例を踏まえながら整理する。なお、地下水モデルによる作業手順の詳細については、他の参考文献(例えば、水収支研究グループ、1993: Anderson、1992)を参照されたい。

* 国際航業株式会社

表1 シミュレーションモデルの種類
(水収支研究グループ(1993)、Todd, D.K. (1980)
をもとに作成)

モデルの名称	内容
多孔質体モデル (Porous Media Models)	砂箱などに作成した帯水層のミニチュア。 物質の拡散を調べる際には、現在も利用されている。
アナログモデル (Analog Models)	地下水の流動を相似な粘性流体や電気の流れに置き換えてシミュレートするもの。電気アナログモデルがもっとも代表的なものである。現在では、ほとんど利用されていない。
解析モデル (Analytical Model)	理想的な条件のもとで、地下水流動などの物理現象を表す方程式を解析的に解くもので、厳密解が得られる。井戸公式が代表的。解を得るに当たって設定した条件が、適用しようとする水文地質条件に合致するかを判断する必要がある。
数値モデル (Numerical Model) (Digital Computer Model)	地下水流動などの物理現象を表す方程式を数値解法で解く方法。複雑な水文地質条件でも適用可能であり、現在では、もっとも広く用いられている。

2 地下水モデル上でのかん養量

地下水モデルでは、地下水流動に関わる主要な要素を整理し、以下の地下水流動方程式を解いて、地下水位および流動量を求める。

三次元の地下水流動は次式で表わされる (Anderson, 1992)。

$$\frac{\partial}{\partial x} (K_x \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_y \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_z \frac{\partial h}{\partial z}) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - R \quad (1)$$

ここに、 h ：ポテンシャル水頭、 K_x 、 K_y 、 K_z ： x 、 y 、 z 座標方向の透水係数、 R ：吐き出しと吸い込みに関わるボリュームフラックス(流束)、 S_s ：比貯留量、 t ：時間。

地下水モデルでは、一般に(1)式を有限要素法あるいは差分法を用いて解き、任意地点と時間における h を得ることになる。いずれの方法でも、下記の初期条件を与える必要がある。

$$h(x, y, z, t) = h_0, \text{ただし、} t = 0 \quad (2)$$

ここに、 x 、 y 、 z ：有限要素あるいは差分格子の全ての節点座標、 h_0 ： $t = 0$ 時の水位。

また、下記の境界条件を与える場合がある。

$$h(x, y, z, t) = h_i \quad (3)$$

$$W(x, y, z, t) = W_t \quad (4)$$

ここに、 x 、 y 、 z ：有限要素あるいは差分格子

の任意の節点座標、 h_i 、 W_t ：任意の節点座標および t における水位および流束。

地下水モデルでは、流束成分の一つとして、既知のかん養量を与えることが一般的である。

3. かん養量の推計

かん養量の推計方法として、下記の方法が挙げられる。

- ① ライシメーター等による、浸透する量の計測。
- ② 特定の範囲の地表水、降雨量、蒸発量を計測し、水収支的に地中に浸透する量を求める。
- ③ 地中の土壌水分量あるいは水圧を計測し、降雨前後の水分量の変化からかん養量を求める。
- ④ 地下水位変化量から地下水かん養量を求める。
- ⑤ 雨水の流出及び浸透をモデル化。

①～③は観測結果よりかん養量を推計する方法であり、④と⑤は浸透機構を、いくつかの仮定を設けて模擬的に扱う方法である。本論では、④と⑤について説明する。

3. 1 地下水位からかん養量を推計する方法

本方法は、さらに2つに区分される。

(1) 短期的な水位変化

降雨時の地下水位上昇量から、雨水浸透量を推計することができる。

① 考え方

図1に示すように、雨水のみで地下水位が上昇する、すなわち、地下水揚水や河川の影響がなく、地下水流入・流出が無視しうる程度の短期間の地下水位上昇量は次式で表される。

$$dh/dt = (P - F) / n_e \div I \cdot P / n_e \quad (5)$$

ここに、 dh/dt ：単位時間当たりの地下水位上昇量、 n_e ：帯水層の有効間隙率、 I ：雨水浸透率、 P ：降雨量、 F ：地表流出量(降雨量のうち、一定割合が流出すると仮定)。

各降雨時の地下水位上昇量を抽出し、(5)式より降雨量との比率を求めることで、浸透率を推定することができる。

② 推計事例

A 観測井の地下水位連続観測記録(図2)より、降雨時に地下水位が上昇しているものを読み取り、データを抽出した。表2にはデータ整理結果を示す。

降水時の地下水位変化

降水量と地下水位変化量の関係

図1 短期的な水位変化からのかん養量の推計

例えば、1月17日に連続して降った雨の総量は25mmであった。A観測井の地下水位は、降雨直前で6.64mであったが、降雨によって水位は上昇し、6.70mにまで上昇した。この水位上昇量が雨の浸透によるものであり、地下水流入や地下水流出はないものと仮定すると、間隙率0.07の帯水層中で、地下水位が0.06m上昇するために必要な水量は、 $60\text{mm} \times 0.07 = 4.2\text{mm}$ である。実際には、25mmの雨が降っているので、 $4.2\text{mm} \div 25\text{mm} = 0.168$ 、すなわち、降雨のうち約17%が地下にしみ込めば、観測水位の変化を説明することができる。

降雨からの浸透量は、浸透直前の地盤中の水分量によっても大きく異なるため、複数の降雨イベントについて見る必要がある。また、本推計方法の仮定条件が成り立たない条件、例えば、地表水の影響を受けたり、地下水の流速が早い地点での適用はできない。

(2) 長期的な地下水位変化から推計する方法

① 考え方

〈地下水位低減曲線〉

1 降雨イベント時に上昇した地下水位は、図1のように変化し、ある水位以下にはほとんど低減しない。水収支研究グループ(1973)は、この現象を水位の低下による流出断面積が減少し、流出量と流入量が等しくなったためと評価している。そ

図2 A地点の地下水位観測記録

表2 降雨時の地下水位上昇量から推計した浸透率

有効間隙率= 0.07

降水			地下水位			浸透率
降り始め	降り終わり	合計	上昇前	上昇後	水位差	
		mm	m	m	m	
1/17	1/17	25	6.64	6.70	0.06	0.17
1/28	1/28	11	6.64	6.67	0.03	0.19
2/1	2/1	23	6.64	6.71	0.07	0.21
2/12	2/12	22	6.68	6.71	0.03	0.10
2/20	2/21	17	6.72	6.77	0.05	0.21
3/8	3/8	34	6.69	6.80	0.11	0.23
3/23	3/23	12	6.68	6.73	0.05	0.29
4/12	4/13	30	6.66	6.72	0.06	0.14
5/11	5/12	51	6.66	6.76	0.1	0.14
5/26	5/27	21	6.69	6.74	0.05	0.17
6/9	6/9	17	6.69	6.72	0.03	0.12
6/13	6/14	26	6.72	6.75	0.03	0.08
6/18	6/19	27	6.69	6.76	0.07	0.18

して、降雨後の地下水位は、基底水位 h_a に漸近する地下水位低減曲線として、次式を提示している。

$$h = h_a + (h_0 - h_a) e^{-Ct} \quad (6)$$

ここに、 C ：常数(地下水低減率)、 h ：ある時点 t における地下水位、 h_a ：基底水位、 h_0 ：初期水位。

また、降雨の影響が強く反映されるのは h_a の部分までであって、それ以下の部分まで及ぶことはまれである。地下水位の地下水位低下速度との関係を次式で示される。

$$-dh/dt = C \cdot (h - h_a) \quad (7)$$

ここに、 dh/dt ：地下水位低下速度。

すなわち、地下水位低下速度は、水位 $(h - h_a)$ に比例することを意味している。

〈流入・流出量〉

地下水位観測記録が代表する範囲の水収支は次式で表わされる(水収支研究グループ、1973)。

$$n_e \cdot dh/dt = Q_r - Q_d \quad (8)$$

ここに、 n_e ：有効間隙率、 dh/dt ：時間当たりの地下水位変化、 Q_r ：単位面積当たりの地下水かん養量、 Q_d ：単位面積当たりの地下水流出量。

(7)式で、地下水位低下量に有効間隙率を乗じるとある範囲からの地下水流出量を意味する。したがって(8)式を変形して、

$$\begin{aligned} Q_r &= n_e \cdot (dh/dt) + Q_d \\ &= n_e \cdot (dh/dt) + n_e \cdot C \cdot (h - h_a) \\ &= n_e \cdot ((dh/dt) + C \cdot (h - h_a)) \end{aligned} \quad (9)$$

すなわち、地下水位、基底水位、低減率より、地下水かん養量を得ることができる。地下水かん養量は、地表からの浸透量と地下水流入量の総和であるので、両者の分離には、地下水流入量を別途に推計、あるいは、0と仮定できる範囲の設定が必要である。

3. 2 浸透過程のモデル化

(1) タンクモデル

地表から雨水が地盤中を浸透する過程をモデル化するポイントは、地表流出量の評価と、浸透した水が地表から帯水層に至るまでの時間遅れである。モデル化の方法としては、土壌水分量に応じた透水性の変化を考慮する飽和・不飽和浸透流動方程式を解く方法と、より簡便なタンクモデルを用いる方法とがある。本論では、後者について説明する。

① 考え方と特徴

タンクモデルは地表水の流出解析手法の一つであり、降雨による河川流量変化を解析することを目的としている(菅原、1972)。この場合、地表水の流域を貯留型のタンクに置き換え、流域からの流出状況を再現する。

数値モデルの一手法として、特定の範囲のかん養量や地下水位の挙動を、タンクモデルで模擬することができる(例えば東北農政局計画部、1982)。このモデルでは、地表からの浸透過程を、タンク間の垂直方向の水の移動(主に落下)で模擬するものである。

② タンクモデルの基礎方程式

図3にタンクモデルの概念図を示す。タンクの段数を n 個とし、最下段タンクは帯水層とすると、タンクモデルの基礎方程式は下記のとおりである(建設省河川局(1993)に加筆)。

〈第1タンク〉

$$q_{1j} = \lambda_{1j} \cdot (H_1 - m_{1j}) \quad (10)$$

$$q_1 = \lambda_1 \cdot H_1$$

$$\frac{dH_1}{dt} = R - E - (\sum q_{1j} + p_1)$$

〈第2～n-1段タンク〉

$$q_{ij} = \lambda_{ij} \cdot (H_i - m_{ij}) \quad (11)$$

$$p_i = \lambda_i \cdot H_i$$

$$\frac{dH_i}{dt} = p_{i-1} - (\sum q_{ij} + p_i)$$

〈第n段タンク〉

$$q_{nj} = \lambda_{nj} \cdot H_n \quad (12)$$

$$\frac{dH_n}{dt} = p_{n-1}/n_e - \sum q_{nj}$$

ここに、 q ：流出高、 α ：流出率、 m ：孔の高さ、 p ：タンク間の浸透量、 λ ：浸透率、 H ：タンク内水位、 i ：タンクの番号、 j ：流出孔の番号、 n_e ：有効間隙率、 R ：降雨量及び水田浸透量、 E ：蒸発(散)量、 t ：時間

③ パラメータの設定

第 $n-1$ 段タンクから第 n 段タンクに流入する浸透量 p_{n-1} が、帯水層へのかん養量を意味する。また、計算水位はタンク内の値であるので、タンクの基底の高さを別途、求めておく必要がある。基底水位 (h_a) を標高値で得るならば、次式で変換できる。

$$h_{EL} = h_n + h_a \quad (13)$$

ここに、 h_{EL} ：計算水位(標高 m)、 h_n ：帯水層タンク内の計算水位。

タンクモデルへの主な入力データは、降雨量や水田浸透量、蒸発散量などの地表水系の要素であり、表計算ソフト等で簡便に計算できる。その一方で、降雨量に対して水位や浸透量が非線型であり、また、この計算方法では、降雨イベントからの地下水位変化の遅れを表現でき、タンク内への流入量と流出量が容易に集計できるので、かん養量を含む水収支の内訳の推計も水位計算と同時にできるという特徴がある。ただし、タンク段数などのモデル構造や、流出率、浸透率などのパラメータは、モデル応答値(普通は計算地下水位)と観測値との比較・検証で試行錯誤的に設定する場合が多く、パラメータの物理的な意味付けは難しい。

④ 適用例

図4にはB地点で適用したタンクモデル応答解析結果を、図5にはパラメータを示す。また、この時の平均かん養量は降雨量に対して、0.25の比率であった。

(2) 浸透能から推計する方法

① 考え方

浸透は土壤中へ水が入る過程であり、浸透能は土壤表面を横切る流束の最大値である(カークビー、1983)。その値は地形、植生等の土壤表面の状態で異なるとされている。一般に、浸透能は土壤中の水分量によっても変化し、一般に浸透の初期(初期浸透能)では大きく、指数曲線的に減少してある一定の値(最終浸透能)を示すようになる(図6)。

② 浸透能と降雨量

最終浸透能までに至る過程では、地表から浸透した水の一部は土壤水分量の増加に消費される。浸透状況が一定になった状態である最終浸透能を

図3 タンクモデルとパラメータ
(本図は3段タンク)

図4 B観測井タンクモデル応答結果

図5 B観測井タンクモデルパラメータ

地下水に付加する単位時間当たりの量と考えるならば、図7に示すように降雨量を地表流出量と浸透量(ただし蒸発散成分を含む)に分離できる。この方法では、時間あるいは分単位の降雨量を用いるが、浸透機構をモデル化するものではなく、一部のデータのみを詳細に扱う必要はないことから、筆者は時間雨量で浸透量を推計する場合が多

い。時間雨量データがない場合は、日雨量をもとにハイトグラフ式から求めることも可能である(例えば、金丸、他、1975)。

求めた浸透量から蒸発散量を除いた量が、地下水に付加されるかん養量となる。

③ 適用例

式で、最終浸透能を地形や地目別に設定することで、各々の浸透量を推計することが可能となる。角屋(1967)は土地利用に応じて浸透能を設定し、浸透能自体も土壌水分量の関数として取り扱う事で、猪名川流域の浸透量を推計している。

図8には、地目別の浸透能から推計した熊本地域の地下水かん養量分布図を示す(熊本県、熊本市、1996)。

4. 留意点

従来、感覚的に、雨水からのかん養量は1日1 mm程度、あるいは、降雨量の1/3程度と言われてきた。たしかに、雨水浸透量<降雨量-蒸発散量であり、0 mmよりは大きいので、これらの値は、その範囲に入っている点で誤りではない。ただし、筆者が地下水モデル解析の過程で推計し

図6 浸透強度(浸透能)の時間変化
(熊本県、熊本市、1995による)

たかん養量は、降雨量の $1/2$ を上回る場合(地域、時期による)もあれば、 $1/5$ をはるかに下回る場合もあった。

さらに、被圧帯水層では、水文地質構造上、帯水層上面に難透水層が分布するため、地表からの浸透した水は、直接的には、被圧帯水層には到達しない。主なかん養は、漏水あるいは水平方向の地下水流動と考えることができる。

地下水モデリングに限らず、水収支を解析・評価するためには、対象とする地域の地形・地質、土地利用などから、浸透機構を設定あるいはかん養量を推計することが必要である。

かん養量は、多くの場合、直接的に観測することが難しく、対象範囲が広いほど、浸透条件(透水係数、帯水層厚、土地利用、さらには降雨量なども)が不均質になるため、困難さは増大する。そのため、地下水位や地表流出量などから、間接的にかん養量を求めることになる。

かん養量をパラメータ化する場合、求めたかん養量が地下水モデル全域を代表しているかどうかの検証が必要である。そこで、次の作業も行うこ

図7 時間降水量、浸透量、地表流出量

とが望ましい。

- ・複数の方法でかん養量を求め、相互の値を比較する(クロスチェック)。
- ・求めたかん養量を、地下水モデルに入力し、地下水位変動量等のモデル応答値と観測値を比較する。

このことは、かん養量に限らず、地下水モデルを用いる上での、基本スタンスとも言える。

本論が、現場での様々な問題の参考になれば、幸いである。

図8 地区別の推計かん養量(1990年時)
(熊本県、熊本市、1995による)

参考文献

- 角屋睦男(1967):山地小流域河川の低水解析(2)、京都大.
- 菅原正巳(1972):流出解析法、共立出版、pp257.
- 水収支研究グループ(1973):地下水資源学、共立出版、p397.
- 金丸昭治、高棹琢磨(1975):水文学、朝倉書店、p223.
- Todd,D.K.(1980):Groundwater Hydrology, JOHN & WILEY SONS, p535.
- 東北農政局計画部(1982):山形盆地地区地盤沈下調査報告書(地盤沈下編)、p139.
- カークビー、M.J.、日野幹男他訳(1983):新しい水文

- 学(原著は Hillslope Hydrology)、朝倉書店、p330.
- Anderson, M.P.(1992):APPLIED GROUNDWATER MODELING, Academic Press, p381.
- 建設省河川局監修(1993):地下水調査および観測指針(案)、山海堂、pp330.
- 水収支研究グループ(1993):地下水資源・環境論、共立出版、p350.
- 熊本県、熊本市(1995):熊本地域地下水総合調査報告書、p122.
- 地学団体研究会(1996):新版地学辞典、平凡社、p1443
- 学防災研究所年報第13号B.

(受付:1999年7月8日、受理:1999年7月14日)